

Untersuchungen zum Einfluß hoher Betriebstemperaturen auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton in massigen Konstruktionen der Energie- und Abfalltechnik

Abschlußbericht

erstattet von

Dr.-Ing. U. Diederichs

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Mai 1993

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Gefördert mit Mitteln zur verstärkten Förderung der wissenschaftlichen For-
schung in Niedersachsen.

Az.: 2095 - BV 4 e - 28/86 vom 25.03.1987

Inhaltsübersicht

1. Einleitung
2. Stand der Kenntnisse
3. Versuchsprogramm
4. Experimentelles
 - 4.1 Hochtemperaturprüfstand
 - 4.2 Versiegelungseinrichtung
 - 4.3 Probekörper
 - 4.4 Versuchsdurchführung
5. Versuchsergebnisse
 - 5.1 Dichtigkeitsprüfung der Versiegelungseinrichtung und Ermittlung der Innendruck-Längskraft-Beziehung als Funktion der Temperatur
 - 5.2 Spannungs-Dehnungs-Versuche bei erhöhten Temperaturen
 - 5.3 Instationäre Kriechversuche
 - 5.4 Zwängungsversuche
 - 5.5 Stationäre Kriechversuche
6. Diskussion der Versuchsergebnisse im Hinblick auf ihre praktische Anwendung
7. Zusammenfassung
8. Schrifttum
9. Anhang - Tabellen + Bilder

1. EINLEITUNG

Beton wird bereits seit längerer Zeit als Konstruktionswerkstoff für massige Konstruktionen der Energie- und Abfalltechnik eingesetzt. Zum Beispiel für Sicherheitsumschließungen, Reaktordruckbehälter, Lagerbecken, Heißgaskanäle von Kokereien, Warmwasserenergiespeicher; weitere Anwendungen befinden sich zur Zeit im Planungs- bzw. Erprobungsstadium, wie Abdichtungen für Endlagerstollen oder Solarenergiewärmespeicher. Hierbei werden die Bauteile in der Regel langandauernd hohen Betriebstemperaturen ausgesetzt. Fast immer sind im gestörten Betrieb kurzzeitig einwirkende noch höhere Temperaturen zu berücksichtigen /1-5/.

Aus den Anforderungen an die Bauteile resultieren entsprechende Anforderungen an den Beton. Sie betreffen hier Festigkeit, Verformung, Zähigkeit, Stabilität in thermischer und chemischer Hinsicht, Permeabilität und Porosität. - Während für übliche Bauwerke und Bauteile die Baustoffeigenschaften für den Temperaturbereich von etwa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu bestimmen ist, sind sie nun von Minusgraden bis teilweise zu den Schmelztemperaturen der Baustoffe, bei Beton etwa $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, zu betrachten /3/.

Viele der bisher durchgeführten Untersuchungen konzentrierten sich auf das Verhalten von Beton, der während der Aufheizung und der Temperierung frei austrocknen kann. Mit solchen Versuchen kann das Werkstoffverhalten bei feingliedrigen Bauteilen ausreichend genau beschrieben werden /2,5/. Die Bauwerke der Energietechnik weisen im Gegensatz zu üblichen Hochbauten i.a. relativ große Bauteilabmessungen und sehr massige Bauteile auf. Da gleichzeitig häufig hochfeste Betone sehr geringer Porosität verwendet werden, ist auch bei hohen Temperaturen kaum mit einem Austrocknen des Betons zu rechnen. Ein großer Kernbereich bleibt immer feucht. Der Feuchtigkeitsgehalt des Betons bestimmt jedoch entscheidend seine Materialeigenschaften.

Im folgenden wird über Versuche mit Betonproben berichtet, die während der Temperierung in dampfdichte Gefäße eingeschlossen waren, bei denen also kein Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebung stattfinden konnte. Hauptziel der Untersuchungen war es, Kenntnisse über das Verformungsverhalten von versiegelt temperiertem Beton während und nach der Aufheizung auf Temperaturen von max. $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu erlangen, um dickwandige massive Betonbauteile, die im normalen oder gestörten Betrieb erhöhten Temperaturen ausgesetzt sind, wirtschaftlich und sicher bemessen zu können.

2. STAND DER KENNTNISSE

Als Baustoff für die Erstellung von Anlagen der Energie- bzw. Abfalltechnik hat sich aus sicherheitstechnischen und aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen die Verwendung von hochfesten Betonen durchgesetzt. Trotzdem weisen die Bauwerke - im Gegensatz zu üblichen Hochbauten - im allgemeinen relativ große Bauteilabmessungen und sehr massige Bauteile auf. Gleichzeitig haben hochfeste Betone eine sehr geringe Porosität und somit eine hohe Dichtigkeit. Daher ist auch bei Einwirkungen hoher Temperaturen kaum mit einem Austrocknen des Betons zu rechnen. Ein großer Kernbereich bleibt immer feucht /1,2/. Der Feuchtigkeitsgehalt des Betons bestimmt jedoch entscheidend seine Materialeigenschaften /3,4/.

Alle bisher durchgeführten Untersuchungen des Materialverhaltens konzentrierten sich auf das Verhalten von Beton, der während der Aufheizung und der Temperierung frei austrocknen oder seine Feuchtigkeit der Umgebungsfeuchtigkeit angleichen konnte (sog. "unversiegelte" Bedingungen) /5-11/.

Mit den bei den Versuchen gemessenen Festigkeits- und Verformungskennwerten kann das Verhalten von feingliedrigen Bauteilen ausreichend genau beschrieben werden. Eine vollständige Literaturübersicht findet sich in /7/.

Versuche mit Betonproben, die während der Temperierung in dampfdichte Gefäße eingeschlossen wurden, bei denen also kein Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebung stattfinden konnte ("versiegelte" Bedingungen), wurden ebenfalls in geringer Zahl durchgeführt /1/. Die Bestimmung der Verformungs- und Festigkeitseigenschaften erfolgte jedoch wegen experimenteller Schwierigkeiten fast ausnahmslos nach Wiederabkühlung und Ausbau der Proben aus dem Drucktopf (s. z.B. /10,11/), lediglich Hilsdorf /8/ berichtet über Messungen der thermischen Ausdehnung von Beton unter versiegelten Bedingungen.

Im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz wurden auf dem Gebiet der experimentellen Ermittlung des Hochtemperaturverhaltens von Beton umfangreiche Untersuchungen durchgeführt (vgl. u.a. /5,10/). Eine Reihe von Untersuchungen betraf das Festigkeits- und Verformungsverhalten von versiegelt temperiertem Beton, jedoch erfolgten die Untersuchungen erst nach Abkühlung und Ausbau der zu untersuchenden Proben. Begleitend zu diesen Versuchen wurden bereits die Veränderungen der Mikrostruktur sowie Änderungen in den korrosionsschützenden Eigenschaften des Betons studiert.

In einer Pilotstudie wurde eine Meßeinrichtung entwickelt, die es gestattet, Betonproben mit einem Durchmesser von 8 cm unter versiegelten Bedingungen bis max. 300 °C aufzuheizen und im erhitzten Zustand auf deren Druckfestigkeit zu prüfen. Herzstück der Anlage ist ein preiswerter Edelstahlbalgen, für den bei Temperaturen von ca. 300 °C ein max. Innendruck von 100 bar zugelassen ist und dessen Steifigkeit in Richtung Längsachse zu vernachlässigen ist. Anfängliche Dichtungsprobleme hierbei konnten im Verlaufe der Untersuchungen gelöst werden.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse bestätigen die Vermutung, daß sich die Proben hinsichtlich der Druckfestigkeit unter versiegelten Bedingungen ungünstiger verhalten als unter unversiegelten Bedingungen. Im Hinblick auf das Verformungsverhalten scheinen die Unterschiede zwischen versiegelt und unversiegelt geprüfte Proben nicht so gravierend zu sein. Das bisher verwendete Verformungsmeßsystem arbeitete jedoch nicht immer zufriedenstellend. Ein Konzept zum Bau eines Verformungsmeßsystems, das die gestellten Genauigkeitsanforderungen erfüllt, war bereits vor Aufnahme der geplanten Untersuchungen ausgearbeitet.

3. VERSUCHSPROGRAMM

Aufgrund des vorliegenden Kenntnisstandes war es das Hauptziel des Forschungsvorhabens, Kenntnisse über das Verformungsverhalten von versiegelt temperiertem Beton während und nach der Aufheizung auf Temperaturen von max. 300 °C zu erlangen, um dickwandige, massive Betonbauteile, die im normalen oder gestörten Betrieb erhöhten Temperaturen ausgesetzt sind, wirtschaftlich und sicher bemessen zu können.

Zur Erreichung des Untersuchungsziels wurde in folgenden Teilschritten vorgegangen:

- Bau und Erprobung einer Versiegelungseinrichtung. Die Versuchseinrichtung sollte ein integriertes Verformungsmeßsystem enthalten und so aufgebaut sein, daß Betonprobekörper (\varnothing mindestens 8 cm, Länge ca. 30 cm) unter versiegelten Bedingungen unter äußerer mechanischer Belastung auf maximal 300 °C aufgeheizt und längere Zeit temperiert werden können.
- Herstellung der für die Untersuchungen benötigten Probekörper.

- Durchführung der Hochtemperaturuntersuchungen an versiegelten Betonproben. - Bei der Ermittlung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Baustoffen im Hochtemperaturbereich ist zu beachten, daß die gemessenen Materialeigenschaften eng mit den zu ihrer Ermittlung angewandten Versuchsmethoden verknüpft sind. Im Fall der Inbetriebnahme und während des Betriebes unterliegt das Material im allgemeinen einer instationären Temperatureinwirkung, woraus sich die Notwendigkeit ergibt, auch Messungen bei instationären Temperaturen durchzuführen. Versuche dieser Art tragen die Bezeichnung:

- instationärer Kriechversuch (bzw. Warmkriechversuch):

Hierbei wird die Last während des Aufheizens des Probekörpers konstant gehalten und die Verformungen gemessen; diese Versuchsart kommt der tatsächlichen Materialbeanspruchung im Bauwerk am nächsten.

- Zwängungsversuch:

Hierbei werden die Anfangsverformungen des Probekörpers während des gesamten Aufheizens konstant gehalten und die aufgrund der Dehnungsbehinderung entstehenden Kräfte gemessen; diese Versuchsart kommt dann der tatsächlichen Materialbeanspruchung im Bauwerk ebenfalls sehr nahe, wenn die Dehnung des erhitzten Bauteils durch angrenzende kalte Bauteile behindert wird.

Darüber hinaus liefern jedoch auch Versuche unter stationären thermischen Randbedingungen, wie z.B. die bekannten σ - ε -Versuche, eine Reihe wertvoller Informationen über das Materialverhalten bei hohen Temperaturen.

Orientierend sollte auch das Kriechen des Materials bei erhöhten Temperaturen ermittelt werden, insbesondere um Anschlußwerte an Versuche, die unter unversiegelten Bedingungen bereits durchgeführt worden sind, zu gewinnen und die Abweichungen vom bekannten Verhalten zu studieren.

Es war geplant, alle vier genannten Versuchsarten für die Untersuchungen an einem Beton der Festigkeitsklasse B 45 heranzuziehen, über den bereits Kenntnisse seines Hochtemperaturverhaltens - jedoch unversiegelte Versuchsführung - vorlagen.

Die Proben (\varnothing 8 cm, Länge 30 cm) sollten wie folgt hergestellt und gelagert werden. Betonage in vorhandenen Stahlschalungen; Ausschaln nach einem Tag und luftdicht in Plastikfolie verpacken, anschließend wenigstens 90 Tage Lagerung in feuchter Umgebung (Feuchtkasten) bis zur Versuchsdurchführung. Mit

den aufgelisteten Maßnahmen sollte ein Feuchtigkeitsaustausch der Proben mit der Umgebung verhindert werden, so daß der Feuchtigkeitsgehalt bzw. die Feuchtigkeitsverteilung der Proben weitgehend den Bedingungen eines Massenbetons entspricht.

- Folgendes Untersuchungsprogramm war vorgesehen:

- σ - ε -Versuche bei Normaltemperatur (drei Referenzversuche).
- σ - ε -Versuche bei erhöhten Temperaturen (acht Temperaturstufen; 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250 und 300 °C).
- Instationäre Kriechversuche (max. Temperatur 300 °C, sechs Belastungsstufen).
- Zwängungsversuche (zwei Anfangsbelastungsstufen).
- Kriechversuche unter stationären Temperaturbedingungen (zwei Belastungsstufen und zwei Temperaturstufen (100 °C und 200 °C)).

- Auswertung der Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse sollten übersichtlich dokumentiert und einer theoretischen Analyse (insbesondere den Vergleich mit Ergebnissen, die bei früheren unter versiegelten Bedingungen durchgeführten Versuchen gewonnen wurden) unterzogen werden. Für die praktische Anwendung sollten die Versuchsdaten entsprechend aufbereitet werden.

4. EXPERIMENTELLES

4.1 Hochtemperaturprüfstand

Für die Durchführung der Versuche stand im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz ein servohydraulischer Hochtemperaturprüfstand zur Verfügung (vgl. Bild 1 und 2). An dem Versuchsstand waren vor Versuchsbeginn kleine Umbauten und Ergänzungen erforderlich.

Die Prüfmaschine besteht aus einem stabilen Rahmen, der zusammen mit dem servohydraulisch geregelten Zylinder für maximale Prüfkraft von 1000 kN ausgelegt ist. Die Kraftmessung erfolgt mit Hilfe einer Ringtorsionskraftmeßdose

(Nennkraft 1000 kN, Gesamtfehler bezogen auf die Nennkraft $\leq \pm 0,02 \%$; genauer als Güteklasse I nach DIN 51 220).

Die Verformungen werden jeweils mit Hilfe von zwei Dilatometern (bestehend aus jeweils zwei Zerodurstäben, einem Parallelenkersystem und einem induktiven Wegaufnehmer mit angeschlossenem Trägerfrequenzmeßverstärker) gemessen (siehe Bild 3). Die Stäbe stützen sich am oberen und am unteren Rand des Versiegelungsgefäßes - jeweils in Höhe der Probekörperstirnflächen - ab. Da der thermische Ausdehnungskoeffizient des Materials, aus dem die Dilatometerstäbe hergestellt wurden, zwei Zehnerpotenzen kleiner als der des Betons ist, sind Korrekturen der gemessenen Verformungen nicht erforderlich. Auch Temperaturunterschiede zwischen Dilatometerstäben und Probenoberfläche führen nicht zu Fehlmessungen.

Die Beheizung der Proben erfolgt über einen elektronisch geregelten 3-Zonen-Kammerofen. Die Temperaturen zur Ofenregelung wurden jeweils auf den Mantelflächen des Versiegelungsgefäß im Abstand von ca. 3 cm von den oberen bzw. unteren Probenstirnflächen und in der Mitte mit Nickel-Chromnickel-Thermoelementen (nach DIN 43 710) gemessen und mit Hilfe eines Kompensationsschreibers aufgezeichnet. Die Messung der Probenoberflächentemperatur erfolgt über ein Nickel-Chromnickel-Mantelthermoelement, welches durch den oberen Deckel des Versiegelungsgefäß durchgeführt und gasdicht eingelötet ist (siehe auch Bild 4).

4.2 Versiegelungsgefäß

Zum dampfdichten Einschluß der Probekörper während der Prüfung bei Temperaturen von max. 300 °C mußte ein spezielles Versiegelungsgefäß entwickelt werden. Nach Prüfung mehrerer Varianten wurde dafür ein Gefäß auf Basis eines Doppelmantel-Edelstahl-Metallbalgens gewählt (s. Bild 4). Weil die Steifigkeit des Betons in Längsrichtung vernachlässigbar gering ist und keine beweglichen Dichtungen erforderlich sind.

Der Balgen ist mit einem Edelstahlboden, welcher eine Ausfräsung zur Fixierung des Probekörpers enthält, fest verschweißt. Am oberen Ende wurde ein entsprechender Flansch angeschweißt, auf den nach Einsetzen des Probekörpers der Deckel nach Auflegen der hochtemperaturbeständigen Dichtung mittels 8 Schrauben aufgeschraubt wird. In dem Deckel ist ein Ni-CrNi-Mantelthermoelement zur Mes-

sung der Temperatur zwischen Balgen und Probenoberfläche eingelötet. Es reicht etwa bis zur halben Probenhöhe in das Gefäß hinein.

Über ein weiteres, im Deckel eingelötetes Rohr ist ein Manometer zur Messung des Gefäßinnendruckes angeschlossen.

Eingeschraubt in den Kopfflansch sind vier Gewindestangen, die zusammen mit einem Stahlring über der Fußplatte einen Käfig bilden, der - beispielsweise bei Ausfall der Hydraulik - den in Längsrichtung wirkenden Innendruck aufnehmen muß.

4.3 Probekörper

Antragsgemäß wurde der Hauptteil der Versuche mit zylindrischen Betonproben (\varnothing 8 cm, l = 30 cm) auf Portlandzementbasis durchgeführt. Daneben wurden auch Proben mit den gleichen Abmessungen aus portlandzementgebundenem Mörtel sowie reiner Portlandzementstein untersucht.

Die Mischungszusammensetzungen der Proben sind in den Tabellen 1 bis 3 zusammengestellt, außerdem enthalten die Tabellen die ermittelten Frischbeton- und Festbetonkennwerte.

Die zylindrischen Proben wurden unter Verwendung von Stahlschalungen hergestellt, jeweils einen Tag nach dem Betonieren ausgeschalt und sieben Tage unter Wasser gelagert. Dann wurden die Mörtel- und Betonzylinder bis zur Versuchsdurchführung in einem Feuchtkasten bei 20 °C und rd. 100 % relativer Feuchte gelagert. Die Zementsteinproben verblieben bis unmittelbar vor dem Einbau in die Versuchsanlage im Wasser.

Alle Proben wurden nach ausreichend langer Erhärtungszeit an ihren Stirnflächen planparallel geschliffen.

4.4 Versuchsdurchführung

Zur Durchführung der Versuche wurden sowohl die versiegelt zu prüfenden als auch die unversiegelt zu prüfenden Proben in das Versiegelungsgefäß eingebaut. Bei den unversiegelt zu prüfenden Proben wurde jedoch auf das Einlegen der Kopfdichtung verzichtet und der Manometeranschluß geöffnet, um den bei der Aufheizung aus den Proben entweichenden Wasserdampf möglichst ungehindert ab-

strömen zu lassen. Durch diese Vorgehensweise sollte sichergestellt werden, daß die Versuchsrandbedingungen - insbesondere die Aufheizbedingungen - bei den unversiegelt und den versiegelt durchzuführenden Versuchen möglichst identisch sind, um die aus der Behinderung des Wasserdampfaustritts resultierenden Effekte auf die Verformungseigenschaften und die Festigkeit eindeutig separieren zu können.

Hinzuweisen ist noch darauf, daß bei den versiegelt zu prüfenden Proben nach ihrem Einbau noch ca. 100 ml Wasser in das Gefäß gegeben wurden, um einen Austritt des Wasserdampfs aus den Proben in den freien Raum zwischen Behälter und Probe weitestgehend ausschließen zu können.

Die Dichtigkeit des Versiegelungsgefäßes während der Versuchsdurchführung wurde durch Aufzeichnung des Behälterinnendrucks, durch Wiegen des geschlossenen Behälters vor dem Einbau in die Prüfmaschine und nach dem Ausbau sowie durch Wiegen der Probekörper vor und nach dem Versuch überprüft. Hierbei stellte sich heraus, daß das Probengefäß während aller Versuchsphasen eine ausreichende Dichtigkeit aufwies und die versiegelt geprüften Proben auch nach ihrem Ausbau keinen Gewichtsverlust, beispielsweise durch Abgabe von Wasser in den Probenbehälter, erlitten hatten.

Zur Ermittlung der σ - ϵ -Linien wurden die Proben nach ihrem Einbau in das Versiegelungsgefäß in die Prüfmaschine eingesetzt und mit einer kleinen Vorlast von rd. $0,1 \text{ N/mm}^2$ belastet. Dann erfolgte eine 3-malige Be- und Entlastung der Proben bis zu rd. $1/3$ der Bruchspannung zur Bestimmung des E-Moduls bei 20°C . Anschließend wurden die Proben unter Aufrechterhaltung der Vorlast mit einer Aufheizgeschwindigkeit von rd. 1 K/min auf die Versuchstemperatur (max. 250°C bis 300°C) aufgeheizt. Nach Erreichen der gewünschten Versuchstemperatur wurden sie noch 2 Stunden bei der Temperatur homogenisiert, wiederum 3-mal zu Bestimmung des E-Moduls bei der Versuchstemperatur be- und entlastet und schließlich im σ - ϵ -Versuch mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit bis zum Bruch belastet. - Bei den versiegelt zu prüfenden Proben wurde die aus dem Wasserdampfdruck resultierende Längskraft unter Benutzung der in Kapitel 5.1 beschriebenen Eichdaten durch manuelle Regelung der Pressenkraft so kompensiert, daß die Probe eine ebenso geringe Vorlast während der Aufheizung aufwies, wie die entsprechende unversiegelte Probe.

Zur Ermittlung des instationären Bruchtemperaturkriechens wurden die Proben nach dem Einsetzen in das Versiegelungsgefäß ebenfalls mit geringer Belastung

in die Prüfmaschine eingebaut, 3-mal mit rd. 1/3 ihrer Bruchlast belastet und wieder entlastet, um den E-Modul bei 20 °C zu bestimmen. Anschließend erfolgte wieder eine Belastung auf die vorgesehene Kriechspannung (beispielsweise 15 N/mm²). Danach erfolgte unter Aufrechterhaltung der Last die Aufheizung auf maximal 250 °C mit rd. 1 K/min. Nach Erreichen der Versuchstemperatur erfolgte die unregelmäßige Abkühlung der Proben auf Raumtemperatur. Nach dem Wiegen der Versiegelungsgefäße wurde die Probe ausgebaut, gewogen und anschließend zur Bestimmung der Restfestigkeit im σ - ϵ -Versuch geprüft.

Die Durchführung der Zwängungsversuche erfolgte in ähnlicher Weise wie die der Warmkriechversuche, jedoch wurde die nach Aufbringen der Anfangsbelastung gemessene Verformung während der dann erfolgten Aufheizung, deren Rate ebenfalls ca. 1 K/min betrug, konstant gehalten und die aus der Dehnungsbehinderung resultierenden Kräfte gemessen.

Die stationären Kriechversuche erfolgten in ihrer Anfangsphase in gleicher Weise wie die instationären Kriechversuche, jedoch schloß sich an die instationäre Phase die Haltezeit an, die bis auf 250 Stunden ausgedehnt wurde.

Eine Zusammenstellung der im einzelnen durchgeführten Versuche ist in den Tabellen 4 bis 6 gegeben.

5. VERSUCHSERGEBNISSE

5.1 Dichtigkeitsprüfung der Versiegelungseinrichtung und Ermittlung der Innendruck-Längskraft-Beziehung als Funktion der Temperatur

Nach Fertigstellung des Versiegelungsgefäßes wurde es mit ca. 200 ml Wasser gefüllt und nach Anschluß des Innenraumthermoelements und des Manometers in die Prüfmaschinen eingebaut, mit dem Dilatometersystem versehen und unter servohydraulisch geregelter Konstanthaltung der Abstände zwischen Fuß- und Kopfplatte stufenweise auf knapp 300 °C aufgeheizt und anschließend in Stufen wieder abgekühlt. Hierbei wurden neben der Innentemperatur, der Dampfdruck und die auf den Prüfzylinder wirkende Kraft gemessen.

Die Messungen ergaben, daß das Versiegelungsgefäß die gewünschte Dichtigkeit aufwies und daß das Verhältnis Innendruck/Temperatur mit entsprechenden Werten der Dampfdrucktabelle für Sattedampf übereinstimmte. Die Auswertung der Rela-

tion zwischen Innendruck und gemessener Prüfzylinderkraft führte auf eine effektive Endfläche des Balgen von rd. 100 cm^2 . Die Steifigkeit des Balgens lag unter der Auflösungsgrenze der Kraftmeßdose für die Messung der Prüfkraft.

Auf der Grundlage der Meßergebnisse wurden die zum Ausgleich des Wasserdampf-innendruckes erforderlichen Pressenkräfte in Abhängigkeit der Innentemperatur des Versuchsgefäßes für die manuelle Kompensation tabelliert.

5.2 Spannungs-Dehnungs-Versuche bei erhöhten Temperaturen

Die Festigkeit und der E-Modul der Portlandzementbetonproben, an denen unter versiegelten Bedingungen bei den erhöhten Temperaturen σ - ε -Versuche durchgeführt wurden, sind in Bild 5 dargestellt. Man erkennt, daß die Festigkeit bereits bei Temperaturen von 100°C auf etwa 75 % der Ausgangsfestigkeit abnimmt. Zwischen 150°C und 250°C geht sie dann sogar auf etwa 60 % zurück, während unversiegelt aufgeheizter und bei erhöhten Temperaturen geprüfter Beton in diesem Temperaturbereich maximal Festigkeitsabnahmen auf 90 % der Ausgangsfestigkeit aufweist /5,6/.

Auch der E-Modul der versiegelt aufgeheizten Proben geht bei den hohen Temperaturen deutlicher zurück als bei unversiegelt aufgeheizt und geprüften Proben. Beispielsweise werden bei quarzitischem Beton bis zu Temperaturen von 200°C noch 60 % des Ausgangs-E-Moduls gemessen /6/, während, wie Bild 5 zeigt, unter versiegelten Bedingungen bereits bei 100°C eine E-Modul-Abnahme auf die Hälfte des Ausgangswertes zu beobachten ist. Bei 250°C zeigen die versiegelten Proben sogar eine E-Modul-Abnahme auf unter 40 % des Ausgangswertes, während dieser Wert bei unversiegelten Proben erst nach Aufheizung auf 400°C erreicht wird /5,6/.

5.3 Instationäre Kriechversuche

Bild 6 zeigt die Ergebnisse von instationären Kriechversuchen, die mit den Betonproben gemäß Tabelle 4 mit 15, 30 und 60 % der bei 20°C an Proben der gleichen Serie ermittelten Kurzzeitfestigkeit aufgeheizt wurden. Die Dehnungskurven mit einem Belastungsgrad von 0 % entsprechen den thermischen Dehnungen.

Insgesamt ist aus den Ergebnissen abzuleiten, daß sich die versiegelt aufgeheizten Proben hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens nur vergleichsweise gering von den unversiegelt aufgeheizten Proben unterscheiden. Die Unter-

schiede liegen im Bereich der üblicherweise bei solchen Versuchen festgestellten Exemplarstreuungen. Aus diesem Grunde wurde das ursprüngliche Untersuchungsprogramm durch Untersuchungen an Mörtelproben, die einen bedeutend höheren Anteil an fluider Zementsteinphase aufweisen als die Betonproben, erheblich erweitert (s. Tabelle 5).

Die Ergebnisse, die mit den Untersuchungen an den Mörtelproben erzielt wurden, sind in den Bildern 7 und 8 wiedergegeben.

Man erkennt, daß sich die unbelastet, versiegelt aufgeheizte Probe bis 250 °C nahezu linear ausdehnt. Die unversiegelte Probe zeigt demgegenüber nach Überschreiten von etwa 120 °C einen degressiven Verlauf der thermischen Ausdehnung.

Die mit 15 und 30 % belasteten Proben weisen ähnliche Dehnungsdifferenzen zwischen versiegelten und unversiegelten Proben auf wie die Proben, mit denen die thermische Ausdehnung bestimmt worden ist. Auch bei den mit 60 % belasteten Proben zeigt sich eine ähnliche Tendenz. Auch hier dehnt sich die versiegelte Probe etwas stärker als die unversiegelte Probe.

In den Bildern 9 und 10 sind die nach der folgenden Formel berechneten, auf den Belastungsgrad α bezogenen transienten Kriechverformungen $\tilde{\epsilon}$ dargestellt.

$$\tilde{\epsilon} = (\epsilon_{\text{tot}} - \epsilon_{\text{el},i} - \epsilon_{\text{th}}) / \alpha \quad (1)$$

In der Gleichung (1) bedeuten: ϵ_{tot} = Gesamtverformung, $\epsilon_{\text{el},i}$ = elastische Anfangsverformung, ϵ_{th} = thermische Ausdehnung.

Bei den Berechnungen wurde für die unversiegelten Proben auch die thermische Ausdehnung der unversiegelten Proben herangezogen, während bei den versiegelten Proben die unter versiegelten Bedingungen gemessene thermische Ausdehnung berücksichtigt wurde. Man erkennt aus den Bildern 9 und 10, daß das bezogene Kriechen $\tilde{\epsilon}$ im Rahmen der üblichen Exemplarstreuungen keine eindeutige Tendenz dahingehend aufweist, daß unversiegelte Proben stärker Kriechen als versiegelte Proben oder umgekehrt, oder daß unversiegelte Proben stärker kriechen als versiegelte Proben.

Um diese Effekte näher zu untersuchen, wurden auch Proben aus Zementstein untersucht (s. Tabelle 6). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Bildern 11 und 12 wiedergegeben.

Aus den Versuchsergebnissen kann unmittelbar die Schlußfolgerung gezogen werden, daß bei der Berechnung der Gesamtverformungen lediglich der Feuchtegehalt bei den thermischen Ausdehnungen der Proben zu berücksichtigen ist, nicht jedoch bei den instationären Kriechverformungen.

Bild 11, das die thermische Ausdehnung von versiegelt und unversiegelt aufgeheiztem Zementstein wiedergibt, ist zu entnehmen, daß die Ausdehnungen bis etwa 130 °C kaum von den Versiegelungsbedingungen beeinflußt werden. Oberhalb dieser Temperatur setzen jedoch bei der unversiegelten Probe infolge der Entwässerung des Zementgels starke Schrumpfungen ein, während bei der versiegelten Probe ein weiter Anstieg der Dehnungen auftritt.

Das bei den versiegelten Proben zu beobachtende Plateau im Temperaturbereich 130 °C ... 200 °C kann durch interne Feuchteumlagerungen im Zementstein erklärt werden. Offenbar wird Wasser aus dem Gel ausgeschieden und sammelt sich in den - sich in diesem Temperaturbereich bildenden - Kapillaren an /8/. Im gleichen Zuge nähern sich die Gelpartikel stärker einander an, wodurch ihre reine Festkörperdehnung kompensiert wird.

Auf die instationären Kriechverformungen der Zementsteinproben, die in Bild 12 wiedergegeben sind, hat der Feuchtezustand offenbar keinen deutlich ausgeprägten Einfluß. Bezieht man die gemessene Stauchung entsprechend Gleichung (1) auf den Belastungsgrad, so erhält man für die Temperaturstufe 250 °C ein $\tilde{\epsilon} = 23,3 \text{ ‰}$. Im Vergleich dazu ergibt die Auswertung der entsprechenden Mörtelkennwerte bei 250 °C ein $\epsilon = 6 \text{ ‰}$. Bezieht man diesen Wert auf den im Mörtel vorhandenen Zementsteingehalt (Zement + Hydratwasser/Zuschlag + Zement + Wasser = 1 + 0,3/3 + 1 + 0,5 = 0,29) erhält man für den Mörtel ein entsprechendes bezogenes $\tilde{\epsilon}^* = 22,5$, welches nahezu identisch mit dem $\tilde{\epsilon}$ des reinen Zementsteins ist.

5.4 Zwängungsversuche

In Bild 13 ist die Zwangskraftentwicklung von versiegelt und unversiegelt aufgeheizten Betonproben, die mit einer Anfangsbelastung von 30 % ihrer Kurzzeitfestigkeit belastet wurden, dargestellt. Man erkennt, daß bei beiden Proben nach linearem Anstieg der Zwangskräfte zu Beginn der Aufheizung ab etwa 80 °C ein Abflachen der Kurven eintritt. Nach Überschreiten des Maximums bei 100 °C (unversiegelte Probe) bzw. 110 °C (versiegelte Probe) nehmen die Zwangskräfte - offenbar infolge Relaxation des Materials - trotz weiterer Temperatursteige-

rung wieder ab. Oberhalb von 170 °C beginnt bei beiden Proben wieder ein leichter Anstieg der Zwangkräfte. Man kann auch hier feststellen, daß sich keine signifikanten, die üblichen Versuchsstreuungen wesentlich überschreitenden Unterschiede zwischen der Zwangskraftentwicklung von versiegelten und unversiegelten Proben zeigt.

In Bild 14 ist die Zwangskraftentwicklung von Mörtelproben der Serie M 10, die mit 30 % ihrer Kurzzeitfestigkeit zu Beginn der Aufheizung belastet worden waren, wiedergegeben. Bis zu etwa 100 °C zeigen bei Proben, wie auch bei den Betonproben, einen fast linearen Anstieg bis auf 50 % der Kurzzeitfestigkeit, dann setzen sowohl bei der versiegelten Probe als auch bei der unversiegelten Probe Relaxationsvorgänge ein. Diese sind bei der unversiegelten Probe stärker ausgeprägt als bei der versiegelten Probe, weil bei der unversiegelten Probe im Zug des Ausdampfens des physikalisch und chemisch gebundenen Wassers Schrumpfprozesse in der Zementsteinmatrix der thermischen Ausdehnung der Zuschläge stärker entgegenwirken als das alleinige Kriechen der versiegelten Probe /6/. Aufgrund des höheren Anteils an fluider Phase ist dieser Effekt deutlich stärker bei den Mörtelproben ausgeprägt als bei den Betonproben.

5.5 Stationäre Kriechversuche

Stationäre Kriechversuche konnten wegen der dadurch bedingten langen Blockade der Versuchseinrichtung nur in sehr geringem Umfang und nur über vergleichsweise kurze Standzeiten durchgeführt werden. Um die Effekte, die sich aus der versiegelten Temperierung ergeben könnten, möglichst deutlich hervortreten zu lassen, wurden die Versuche ausschließlich an Zementsteinproben mit einer Belastung von 30 % der Kurzzeitfestigkeit durchgeführt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 15 dargestellt. Dem Bild ist zu entnehmen, daß die Kriechverformung insbesondere in der Anfangsphase, d.h. in den ersten 10 min. nach Erreichen der Versuchstemperatur, von der Temperatur bestimmt werden. Bei höheren Standzeiten sind nahezu gleiche, d.h., temperaturunabhängige Kriechgeschwindigkeiten zu beobachten.

Auch bei diesen Experimenten zeigt sich, daß das stationäre Kriechen belastet aufgeheizter Zementsteinproben nicht nachweisbar abhängig davon ist, ob der Probekörper frei austrocknen kann oder ob ein Feuchtetransport in die Umgebung unterbunden ist.

Die Versuchsergebnisse bestätigen die eingangs dargelegte Vermutung, daß die Vorgänge im Zementgel bei den versiegelten und bei den unversiegelten Proben ähnlich ablaufen. D.h. in beiden Fällen wird offenbar bei erhöhten Temperaturen Wasser aus dem Gel ausgeschieden, das dann - je nach äußeren Bedingungen - entweder an die Umgebung abgegeben oder in den sich bei der Erwärmung des Zementsteins bildenden Poren abgelagert wird.

6. DISKUSSION DER VERSUCHSERGEBNISSE IM HINBLICK AUF IHRE PRAKTISCHE ANWENDUNG

Die durchgeführten σ - ε -Versuche haben gezeigt, daß im Hinblick auf die Druckfestigkeit bei praktischen Anwendungen die hygrischen Randbedingungen des Betons berücksichtigt werden müssen. - Beton der bei seiner Erwärmung nicht austrocknen kann, verliert bereits ab 100 °C deutlich an Festigkeit. Ab etwa 150 °C weist normalfester Beton, bei dem das Wasser nicht ausdampfen kann, praktisch nur noch rund 60 % seiner 20 °C-Druckfestigkeit auf, während bei gleichem Beton - sofern er austrocknen kann - noch mit 100 % seiner Ausgangsfestigkeit gerechnet werden kann. Die gleichen Überlegungen gelten auch hinsichtlich des Elastizitätsmoduls.

Hinsichtlich des instationären Kriechverhaltens ist zu bemerken, daß alle bisher vorliegenden Ansätze weiterhin für rechnerische Nachweise verwendet werden können. Die unterschiedlichen hygrischen Randbedingungen schlagen sich i.w. nur in der anzusetzenden thermischen Ausdehnung des Materials nieder, während sich die Kriechverformungen als nahezu unabhängig von den hygrischen Randbedingungen erwiesen haben.

Für genauere Berechnungen sind also die Abhängigkeiten zwischen hygrischer Randbedingung und thermischer Ausdehnung zu berücksichtigen, während die vorliegenden instationären Kriechbeziehungen ohne besondere Berücksichtigung der hygrischen Randbedingungen weiterhin bei Bauteilberechnung angewendet werden können.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse stationärer Kriechversuche lassen noch keine fundierten Schlußfolgerungen dahingehend zu, wie die unterschiedlichen hygrischen Randbedingungen in entsprechende Bauteilberechnungen Eingang finden sollten. - Für genauere Abschätzungen wären weitere experimentelle Untersuchungen erforderlich.

7. ZUSAMMENFASSUNG

In Bauwerken der Energietechnik wird der Beton häufig auch bei hohen Temperaturen beansprucht. Da viele der Bauteile sehr massig sind, sind Kenntnisse über die Auswirkungen der Betonfeuchtigkeit auf seine Verformungs- und Festigkeitseigenschaften erforderlich. Um die noch bestehenden Kenntnislücken schließen zu können, wurden Beton, Mörtel und Zementstein unter den beiden extremen Feuchtigkeitsbedingungen: Freie Austrocknung und vollständige Austrocknungsbehinderung untersucht.

Es wurde festgestellt, daß die thermische Ausdehnung im Temperaturbereich oberhalb von 100 °C am stärksten von den Feuchtigkeitsbedingungen abhängt. Proben, bei denen das Wasser nicht verdampfen kann, dehnen sich deutlich stärker aus als Proben, die austrocknen können.

Die instationären Kriechverformungen werden vom Feuchtigkeitsgehalt der Proben nur sehr gering beeinflusst. Bei der Entwicklung von Zwängungskräften führt die höhere thermische Ausdehnung der versiegelten Proben zu höheren Zwangskräften im Temperaturbereich 100 °C bis etwa 250 °C.

Die Festigkeit und der E-Modul werden durch eine hohe Feuchtigkeit bei höheren Temperaturen stärker erniedrigt als dies bei Proben der Fall ist, die frei austrocknen können.

Zur Beurteilung des Einflusses der hygrischen Randbedingungen sind die bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse noch nicht ausreichend.

Die beiden untersuchten Zustände - freie Austrocknung und totale Austrocknungsbehinderung - stellen für den Beton in einem Bauwerk nur die Extremzustände dar. In zukünftigen Untersuchungen sollte der Frage nachgegangen werden, in welcher Weise sich Zwischenzustände der Betonfeuchtigkeit auf das Verformungsverhalten - insbesondere auf die thermische Dehnung - auswirken, denn solche Zustände werden in einem realen Bauwerk überwiegen. Weiterhin wäre zu klären, durch welche mikrostrukturellen Reaktionen im Zementstein das beobachtete Verhalten hervorgerufen wird.

8. SCHRIFTTUM

- /1/ Schneider, U.; Diederichs, U.; Weber, A.: Behaviour of HTR-Concrete at Elevated Temperatures. State of the Art - IAEA Specialists' Meeting on Design, Criteria and Experience with prestressed Reactor Pressure Vessels, 4.-7. Dez. 1984, Lausanne, IAEA-Report: IWGGCR-11, S. 219-231, Lausanne, 1984.
- /2/ Budelmann, H.: Zum Einfluß erhöhter Temperatur auf Festigkeit und verformung von Beton mit unterschiedlichen Feuchtegehalten. Dissertation, TU Braunschweig, 1987.
- /3/ Schneider, U.; Diederichs, U.: Physikalische Eigenschaften von Betonen von 20 °C bis zum Schmelzen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 47. Jg., Teil I, Heft 3, S. 141-149, Teil II, Heft 4, S. 223-230, 1981.
- /4/ Diederichs, U.: Mechanisches Verhalten von Hochtemperatur-Reaktor-Beton (Teil 1 bis 5). Berichte über Untersuchungen im Auftrage der HRB, Mannheim, TU Braunschweig, 1986.
- /5/ Diederichs, U.; Ehm, D.; Hinrichsmeyer, K.; Schneider, U.; Wydra, W.: Hochtemperaturverhalten von Festbeton. Arbeitsbericht 1984 - 1986 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Teil II, Technische Universität Braunschweig, Juli 1987.
- /6/ Diederichs, U.; Hinrichsmeyer, K.: Alterations of the Microstructure of PCRV-Concrete due to Thermal Exposure. Proceedings of the Conference on "Microstructure of Cement and Concrete" (in Vorbereitung).
- /7/ Schneider, U.: Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen. DAFStb, Heft 337, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin - München, 1982.
- /8/ Ziegelsdorf, S.; Kleiser, K.; Hilsdorf, H.K.: Vorherbestimmung und Kontrolle des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Beton. DAFStb, Heft 305, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1979.
- /9/ Kordina, K.; Budelmann, H.: Zum Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton bei instationärem Umgebungsklima. Untersuchungen im Rahmen des Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft "Stoffgesetze im konstruktiven Ingenieurbau", Arbeitsbereiche II/1 und II/2, Institut

für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Februar 1984.

- /10/ Weber, A.; Becker, G.; Diederichs, U.: Effects of Long-Term Thermal Behaviour of HTR-Concrete. Proceedings of the 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper H 5/3, Brussel, Belgium, August 19-23, 1985.
- /11/ Weber, A.; Becker, G.; Schneider, U.: Creep Strength of Sealed Concrete at Elevated Temperatures. Proceedings of the 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper H 5/10, Brussel, Belgium, August 19-23, 1985.

Tabelle 1: Mischungszusammensetzung und Kennwerte der untersuchten Betonproben

Bezeichnung der Probenreihe	Baustoffe	Dosierung
PZ 7	Portlandzement PZ 35 F	345 kg/m ³
	Wasser	173 kg/m ³
	W/Z	0,50
	Zuschlag, gesamt	1862 kg/m ³
	Sand 0/2 mm	559 kg/m ³
	Kies 2/8 mm	745 kg/m ³
	Kies 8/16 mm	559 kg/m ³
	Kennwerte	
	Ausbreitmaß	40 cm
	Verdichtungsmaß	1,12
	Frischbetonrohddichte	2,38 kg/dm ³
	Rohddichte (28 d)	2,37 kg/dm ³
	(444 d)	2,33 kg/dm ³
	Würfelddruckfestigkeit (28 d)	51 N/mm ²
	(444 d)	59 N/mm ²

Tabelle 2: Mischungszusammensetzung und Kennwerte der untersuchten Mörtelproben

Bezeichnung der Probenserien	Baustoffe	Dosierung
M 10	Portlandzement PZ 35 F	491 kg/dm ³
	Wasser	246 kg/dm ³
	W/Z	0,50
	Sand 0/2 mm	1473 kg/dm ³
M 15	Portlandzement PZ 35 F	491 kg/dm ³
	Wasser	246 kg/dm ³
	W/Z	0,50
	Sand 0/2 mm	1473 kg/dm ³
Kennwerte		
M 10	Ausbreitmaß	47 cm
	Verdichtungsmaß	1,02
	Luftporengehalt	5,9 %
	Frischmörtelrohdichte	2,21 kg/dm ³
	Rohdichte (28 d)	2,20 kg/dm ³
	Würfeldruckfestigkeit (28 d)	48 N/mm ²
M 15	Ausbreitmaß	38 cm
	Verdichtungsmaß	1,10
	Luftporengehalt	4,6 %
	Frischmörtelrohdichte	2,21 kg/dm ³
	Rohdichte (28 d)	2,22 kg/dm ³
	Würfeldruckfestigkeit (28 d)	53 N/mm ²

Tabelle 3: Mischungszusammensetzung und Kennwerte der untersuchten Zementsteinproben

Bezeichnung der Probenserie	Baustoffe	Dosierung
Z 2 (117/80)	Portlandzement PZ 35 F	1692 kg/m ³
	Wasser	508 kg/m ³
	W/Z	0,30
	Kennwerte	
	Rohdichte (Zementleim)	2,20 kg/dm ³
	(7 d)	2,19 kg/dm ³
	(28 d)	2,16 kg/dm ³
	Würfeldruckfestigkeit (7 d)	73 N/mm ²
	(28 d)	82 N/mm ²

Tabelle 4: Zusammenstellung der mit portlandzementgebundenem Beton durchgeführten Versuche

Proben- bezeichnung	Proben- material	Versuchsart	Versuchsparameter	gemessene Bruch- spannungen N/mm ²
PZ 7 - 3	Beton	σ - ϵ kalt		48,3
PZ 7 - 12	Beton	σ - ϵ kalt		52,7
PZ 7 - 20	Beton	σ - ϵ kalt		50,1
PZ 7 - 13	Beton	σ - ϵ 100 °C	versiegelt 100 °C	37,8
PZ 7 - 16	Beton	σ - ϵ 125 °C	versiegelt 129 °C	38,4
PZ 7 - 9	Beton	σ - ϵ 150 °C	versiegelt 154 °C	30,8
PZ 7 - 6	Beton	σ - ϵ 175 °C	versiegelt 178 °C	37,8
PZ 7 - 4	Beton	σ - ϵ 200 °C	versiegelt 202 °C	35,0
PZ 7 - 2	Beton	σ - ϵ 250 °C	versiegelt 202 °C	35,8
PZ 7 - 1	Beton	therm. Dehnung	versiegelt	32,8(R) *)
PZ 7 - 11	Beton	therm. Dehnung	unversiegelt 300 °C	42,6 (R)
PZ 7 - 18	Beton	Kriechen 15 %	versiegelt	36,6 (R)
PZ 7 - 17	Beton	Kriechen	unversiegelt 240 °C	46,6 (R)
PZ 7 - 10	Beton	Kriechen 30 %	versiegelt	27,7 (R)
PZ 7 - 5	Beton	Kriechen	unversiegelt	48,8 (R)
PZ 7 - 15	Beton	Kriechen 60 %	versiegelt	abgebr.
PZ 7 - 8	Beton	Kriechen	unversiegelt	34,2 (R)
PZ 7 - 17	Beton	Zwängung 30 %	versiegelt	32,8 (R)
PZ 7 - 14	Beton	Zwängung	unversiegelt	42,2 (R)

*) (R) steht für Messung nach Wiederabkühlung = Restfestigkeiten

Tabelle 5: Zusammenstellung der mit portlandzementgebundenem Mörtel durchgeführten Versuche

Proben- bezeichnung	Proben- material	Versuchsart	Versuchsparameter	gemessene Bruch- spannungen N/mm ²
M 10 - 11	Mörtel	therm. Dehnung	versiegelt 252 °C	36,2 (R)
M 10 - 5	Mörtel	therm. Dehnung	unversiegelt 242 °C	47,2 (R)
M 10 - 9	Mörtel	Kriechen 15 %	versiegelt 261 °C	34,6 (R)
M 10 - 3	Mörtel	Kriechen	unversiegelt 224 °C	52,9 (R)
M 10 - 15	Mörtel	Kriechen 30 %	versiegelt 180 °C	32,4 (R)
M 10 - 17	Mörtel	Kriechen	unversiegelt 250 °C	50,7 (R)
M 10 - 1	Mörtel	Kriechen 60 %	versiegelt 250 °C	35,8 (R)
M 10 - 13	Mörtel	Kriechen	unversiegelt 260 °C	45,8 (R)
M 10 - 7	Mörtel	Zwängung 30 %	versiegelt 253 °C	37,8 (R)
M 10 - 20	Mörtel	Zwängung	unversiegelt 254 °C	42,2 (R)
M 15 - 9	Mörtel	therm. Dehnung	versiegelt 253 °C	47,8 (R)
M 15 - 7	Mörtel	therm. Dehnung	unversiegelt 286 °C	41,2 (R)
M 15 - 2	Mörtel	therm. Dehnung	unversiegelt 300 °C	-
M 15 - 6	Mörtel	Kriechen	versiegelt 244 °C	47,4 (R)
M 15 - 10	Mörtel	Kriechen 15 %	unversiegelt 240 °C	-
M 15 - 4	Mörtel	Kriechen	unversiegelt 300 °C	-
M 15 - 8	Mörtel	Kriechen 30 %	versiegelt 238 °C	53,5 (R)
M 15 - 5	Mörtel	Kriechen	unversiegelt 332 °C	47,2 (R)
M 15 - 3	Mörtel	Kriechen 60 %	versiegelt 257 °C	45,4 (R)
M 15 - 1	Mörtel	Kriechen	unversiegelt 254 °C	41,6 (R)

Tabelle 6: Zusammenstellung der mit Portlandzementstein durchgeführten Versuche

Proben- bezeichnung	Proben- material	Versuchsart	Versuchsparameter
117/80 - 17	Zementstein	Langzeitkriechen 30 %, 120 °C	unversiegelt
117/80 - 7	Zementstein	Langzeitkriechen 30 %, 120 °C	versiegelt
117/80 - 4	Zementstein	Langzeitkriechen 30 %, 200 °C	unversiegelt
117/80 - 6	Zementstein	Langzeitkriechen 30 %, 200 °C	versiegelt
117/80 - 14	Zementstein	Kriechen 30 %	versiegelt
117/80 - 13	Zementstein	Kriechen	unversiegelt
117/80 -	Zementstein	therm. Dehnung	unversiegelt
117/80 - 12	Zementstein	therm. Dehnung	versiegelt

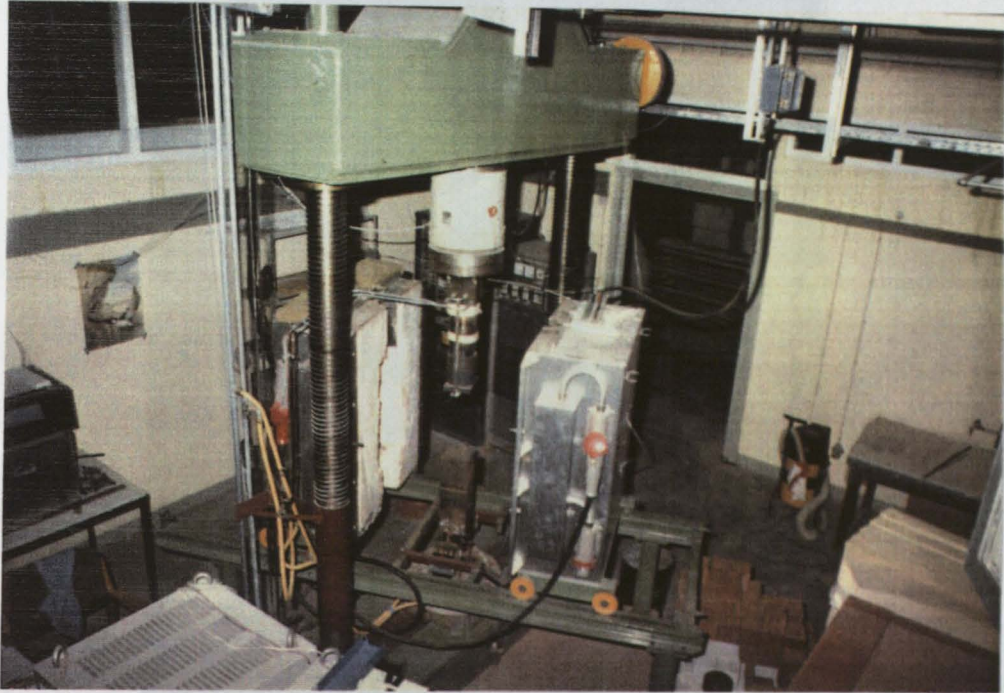


Bild 1: Übersichtsfoto vom servohydraulischen 1000-kN-Hochtemperaturstand

Bild 3: Versiegelungscaß, mit Thermoflanke, Ölwanne und Druckmeß-

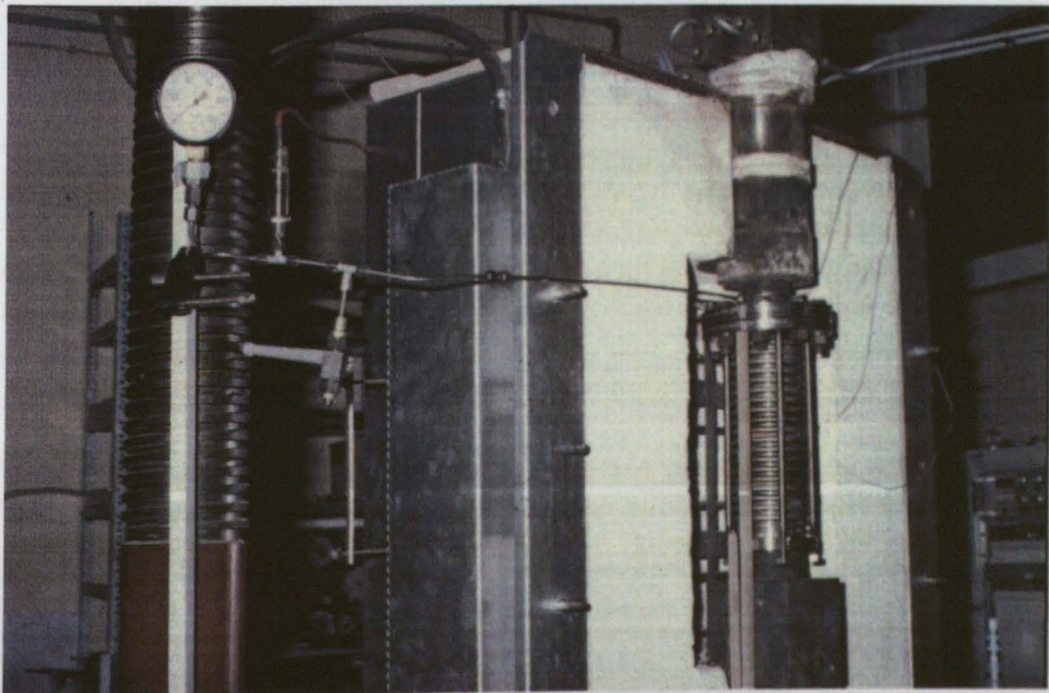


Bild 2: Lasteinleitungssystem, Kraftmeßdose, Verformungsmeßsystem und Heizvorrichtung des Hochtemperaturprüfstandes

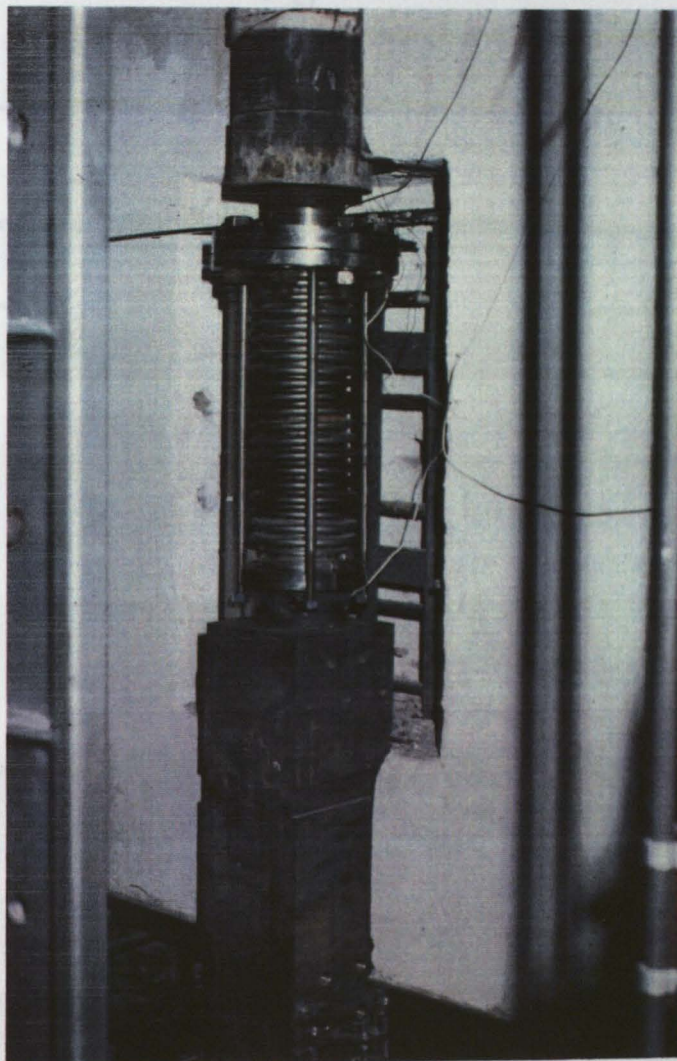


Bild 3: Versiegelungsgefäß, mit Thermoelementen, Dilatometer und Druckmeßsystem

Bild 4: Schematische Darstellung des Versiegelungsgefäßes

Deckel um 45° versetzt gezeichnet

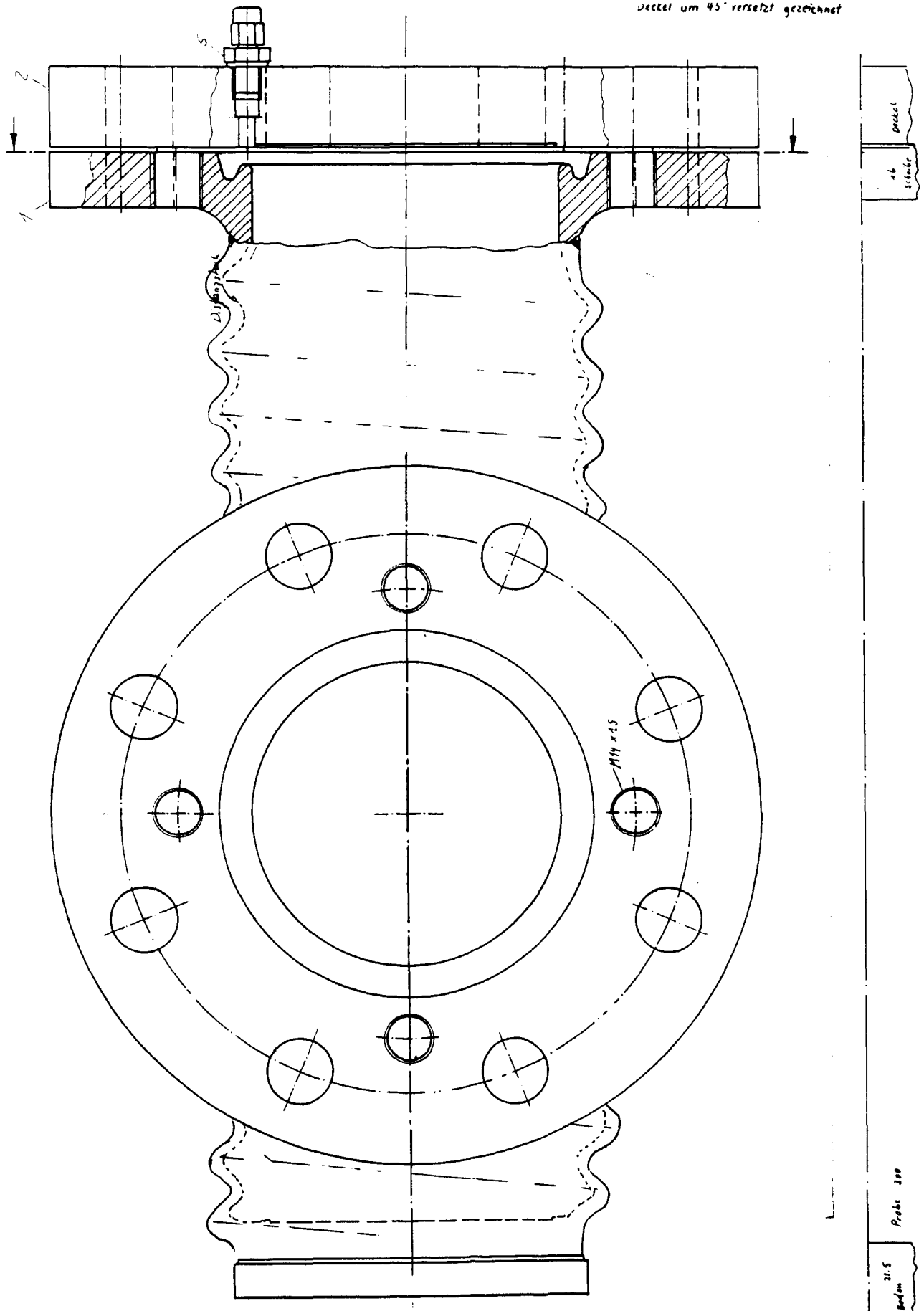


Bild 4: Schematische Darstellung des Versiegelungsgefäßes

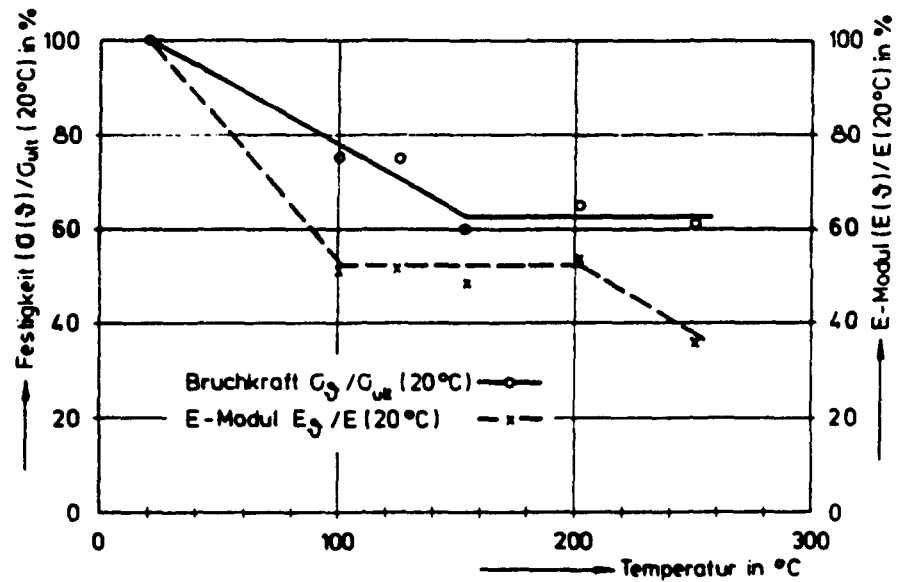


Bild 5: Festigkeit und Elastizitätsmodul von versiegelt aufgeheizten Normalbetonproben

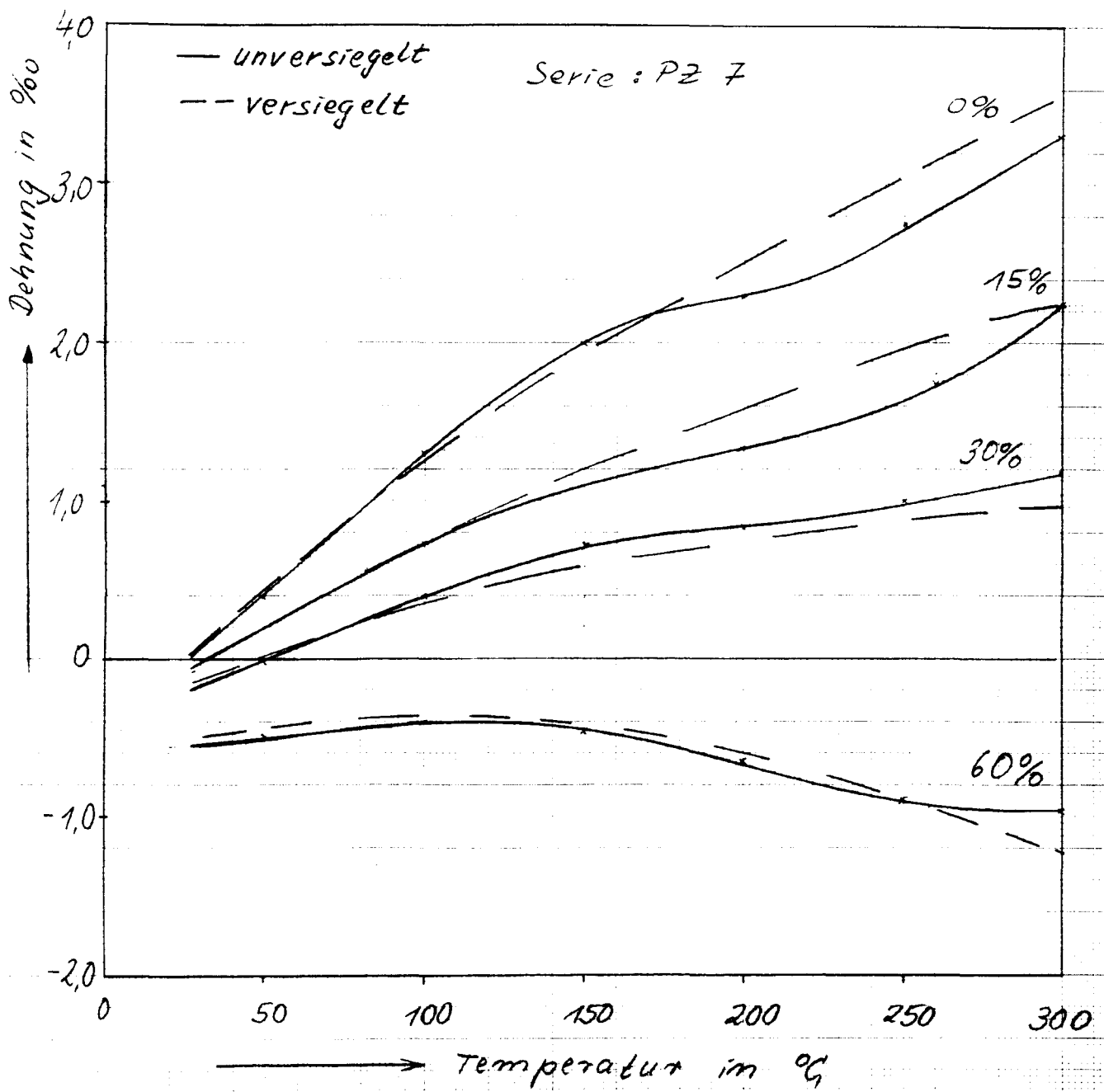


Bild 6: Instationäre Kriechverformungen von versiegelten und unversiegelten Betonproben

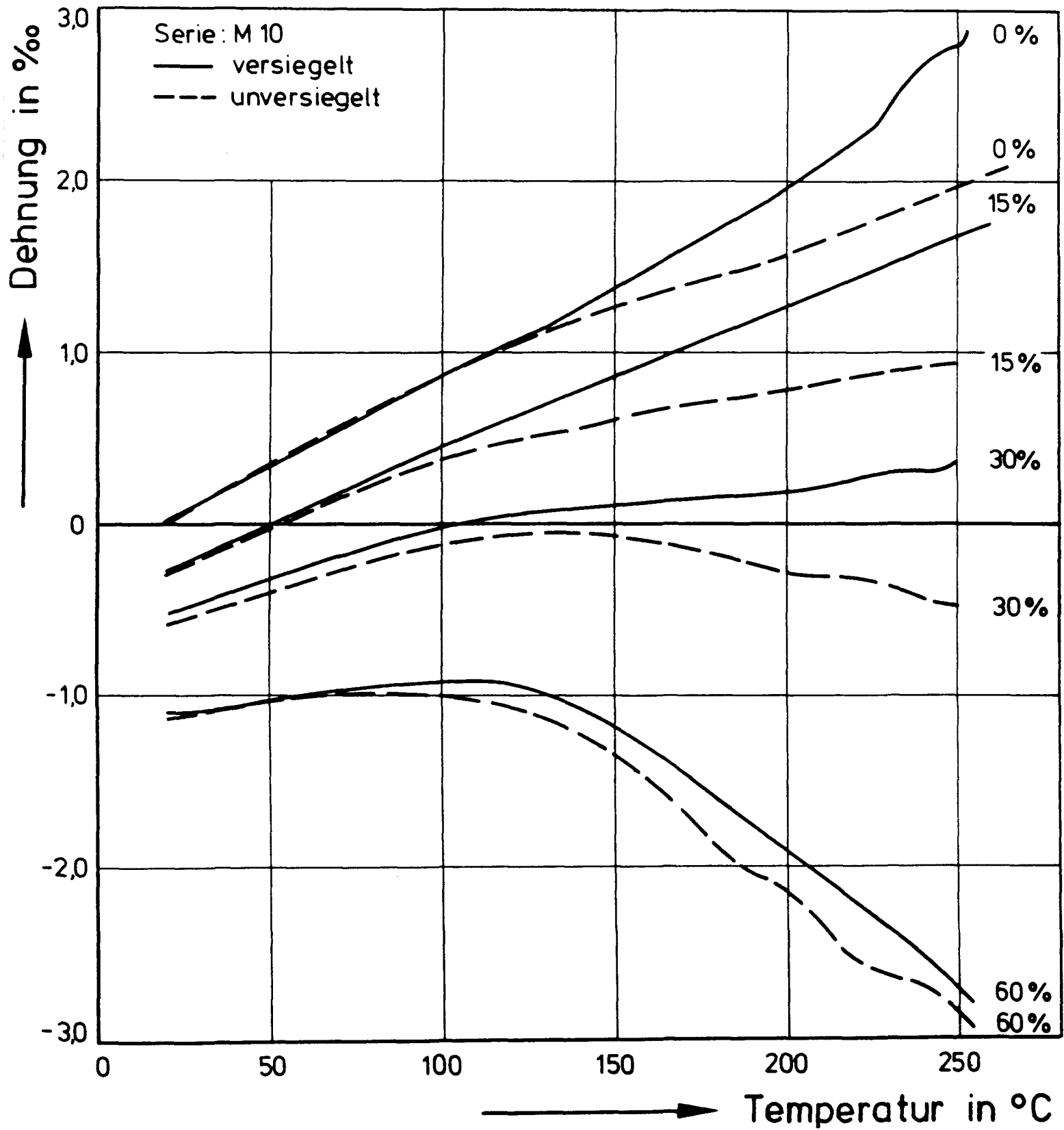


Bild 7: Instationäre Kriechverformungen von versiegelt und unversiegelt aufgeheizten Mörtelproben

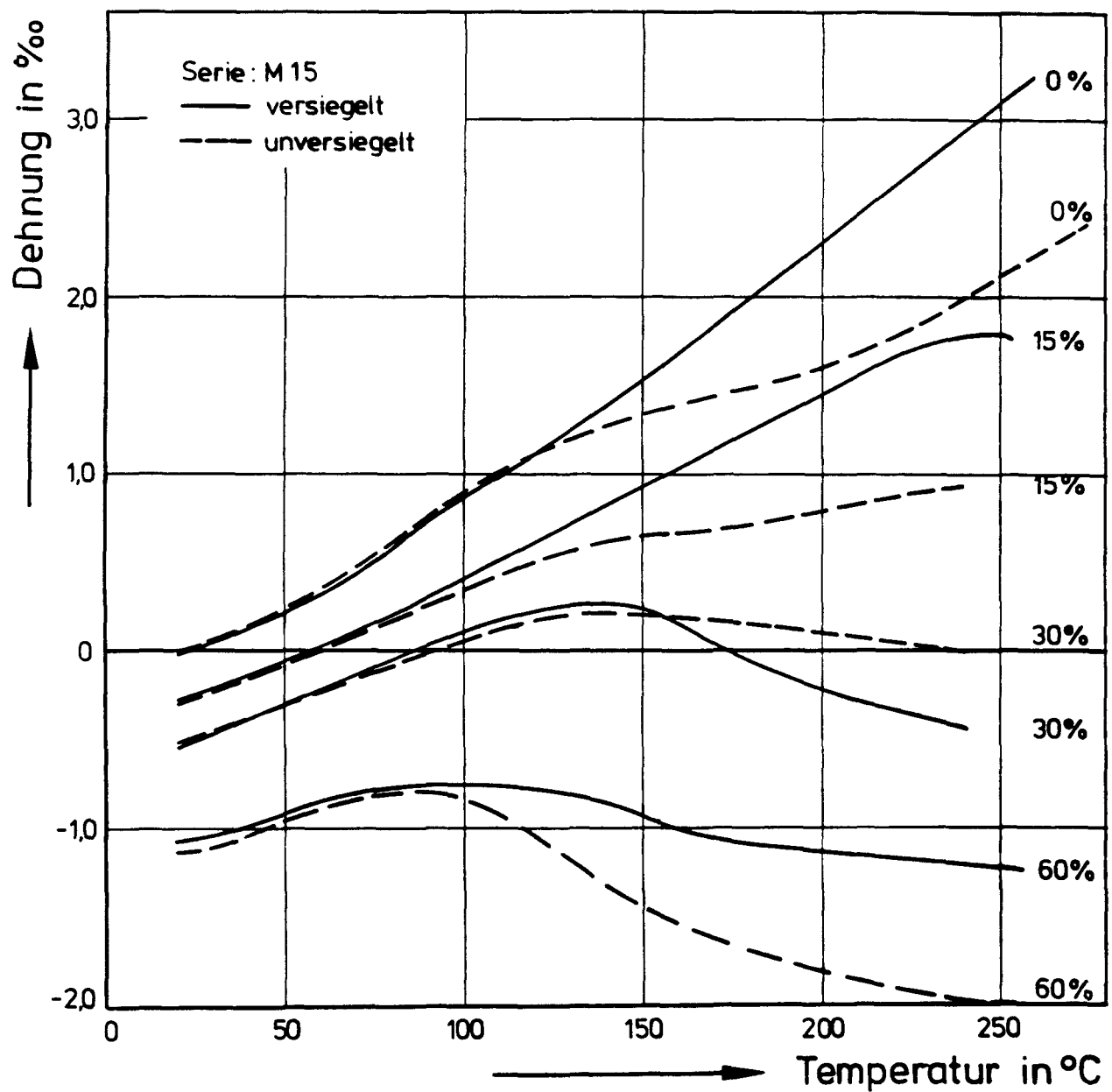


Bild 8: Instationäre Kriechverformungen von versiegelt und unversiegelt aufgeheizten Mörtelproben

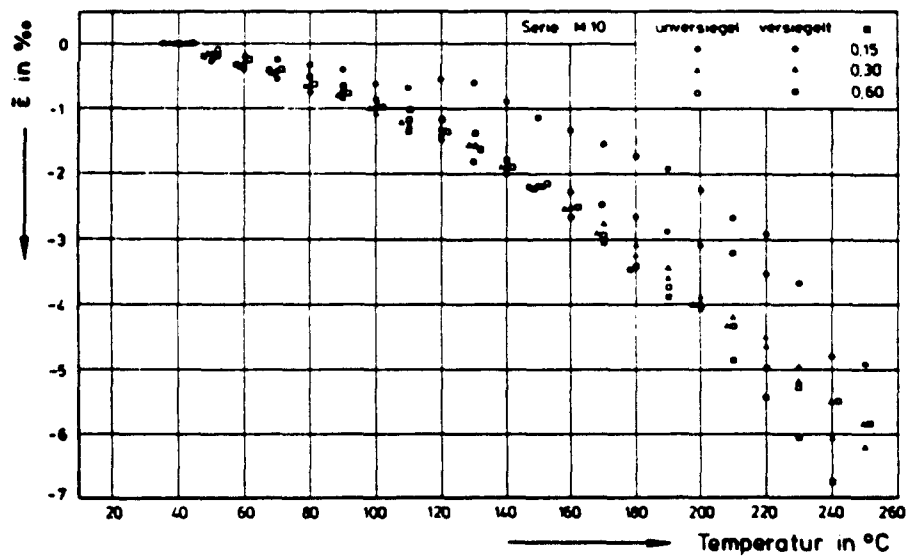


Bild 9: Bezogene transiente Kriechverformungen von Mörtel

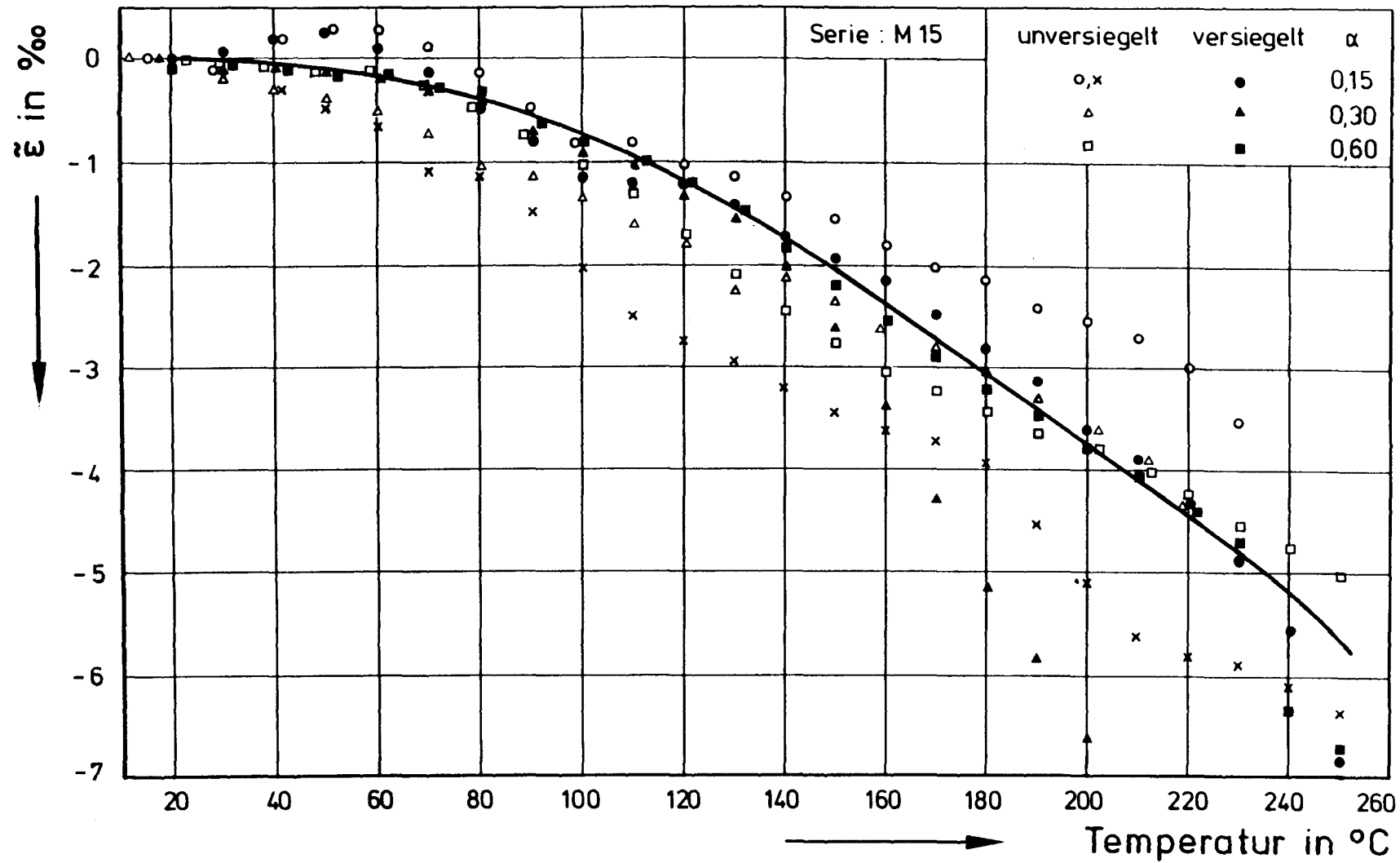


Bild 10: Bezogene transiente Kriechverformungen von Mörtel

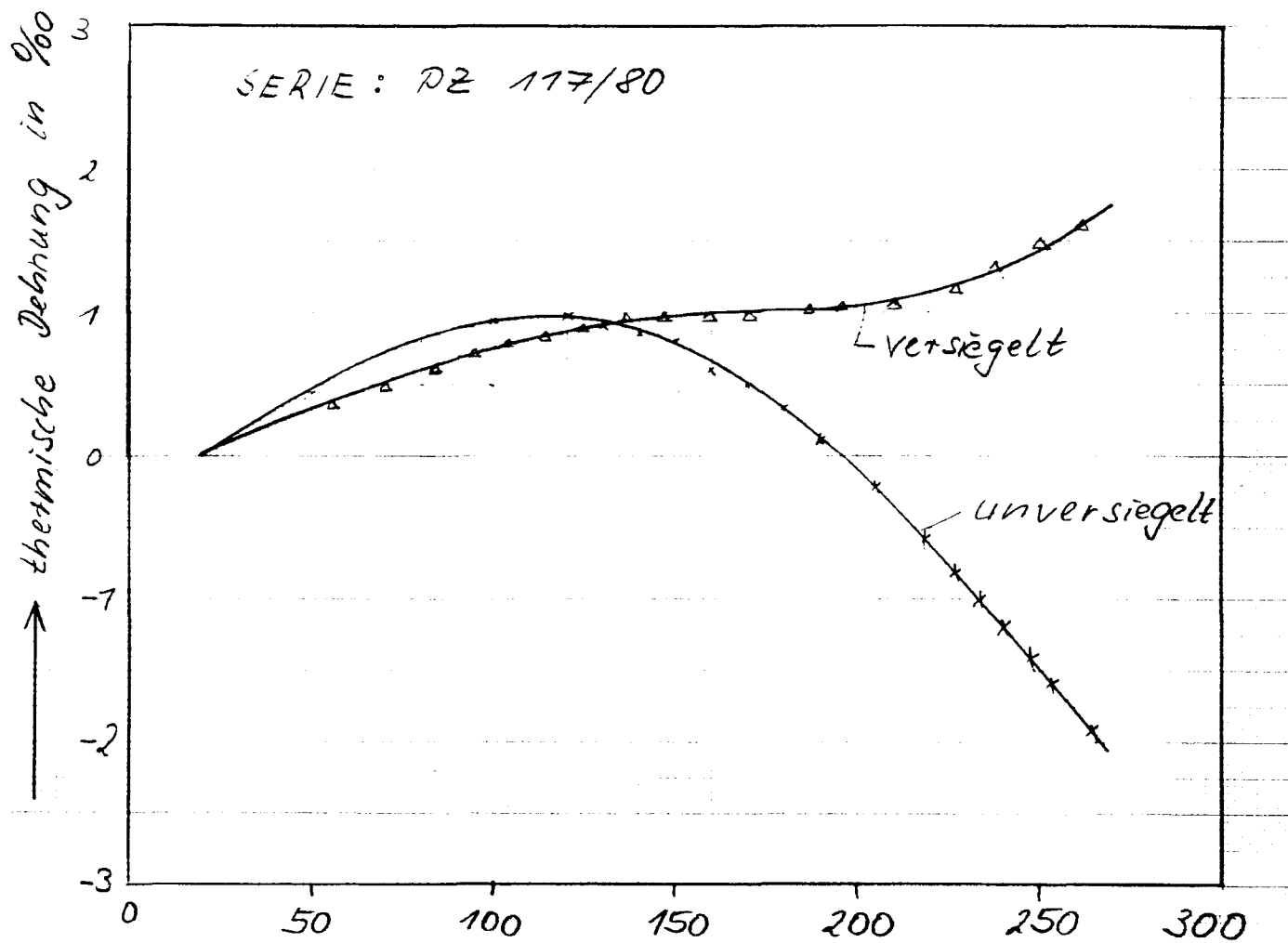


Bild 11: Thermische Ausdehnung von versiegelt und unversiegelt aufgeheizten Zementsteinproben

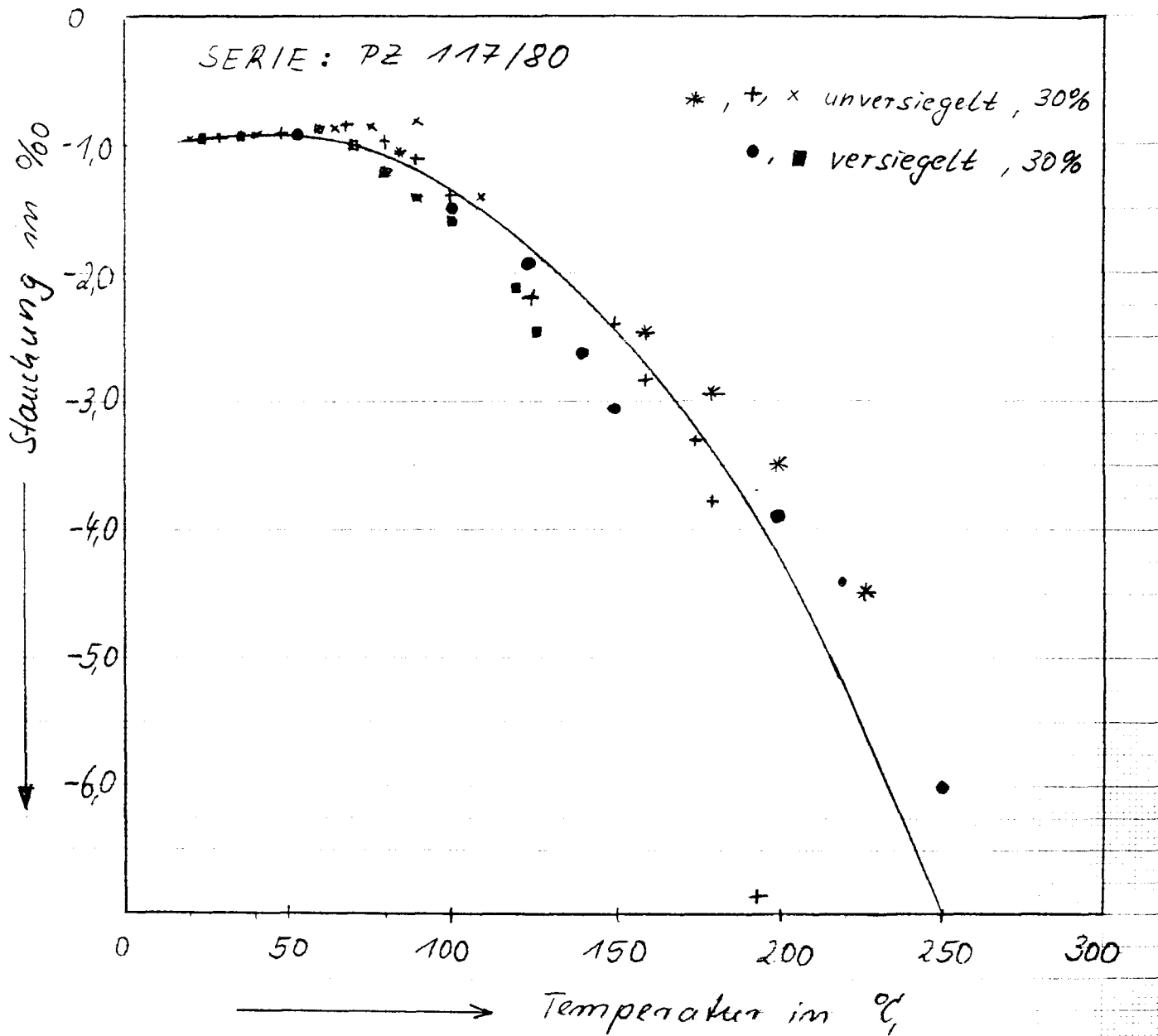


Bild 12: Instationäre Kriechverformungen von versiegelten und unversiegelten Portlandzementsteinproben, die während der Aufheizung mit 30 % ihrer Kurzzeitfestigkeit belastet wurden

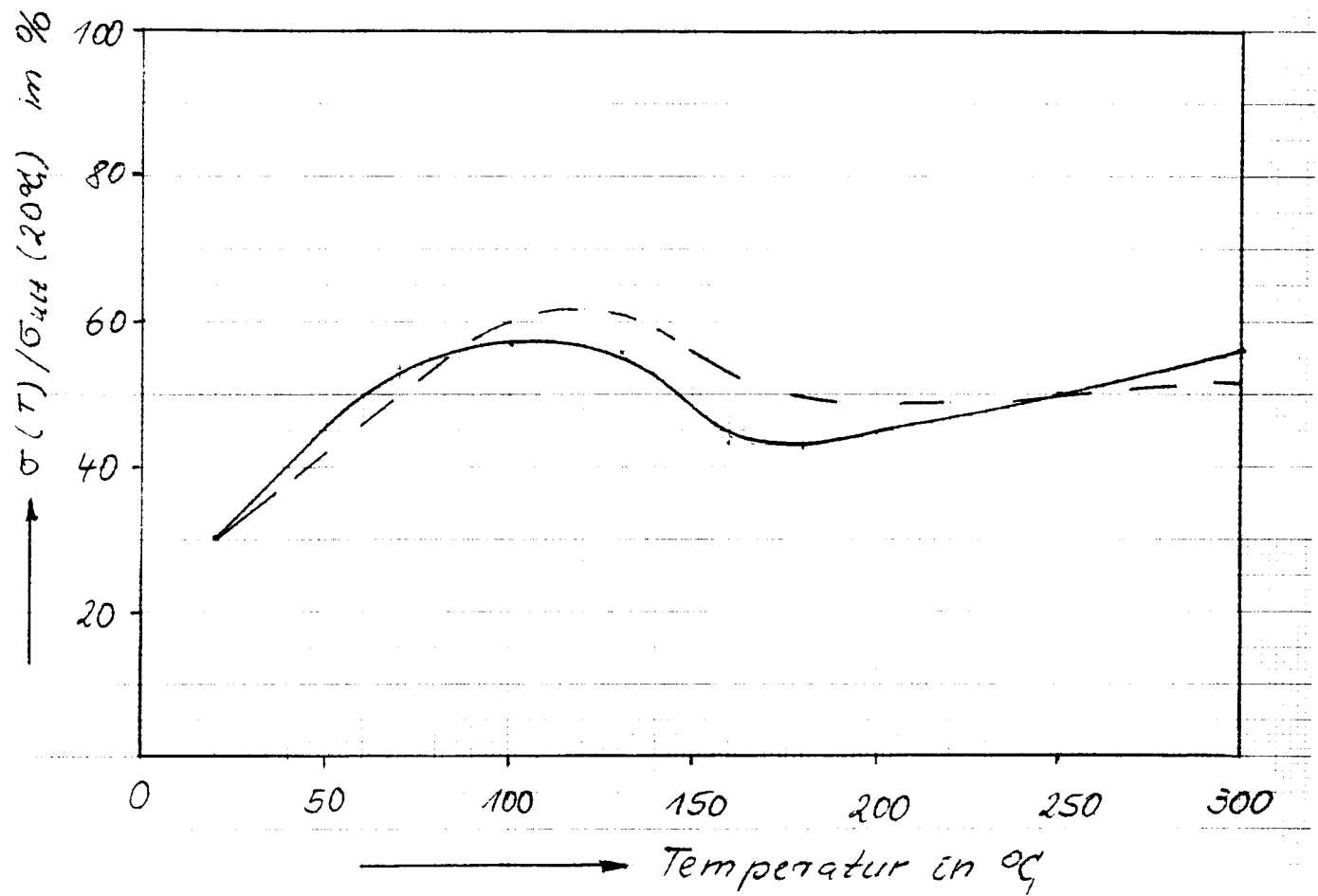


Bild 13: Zwangskraftentwicklung von versiegelt und unversiegelt aufgeheizten Betonproben

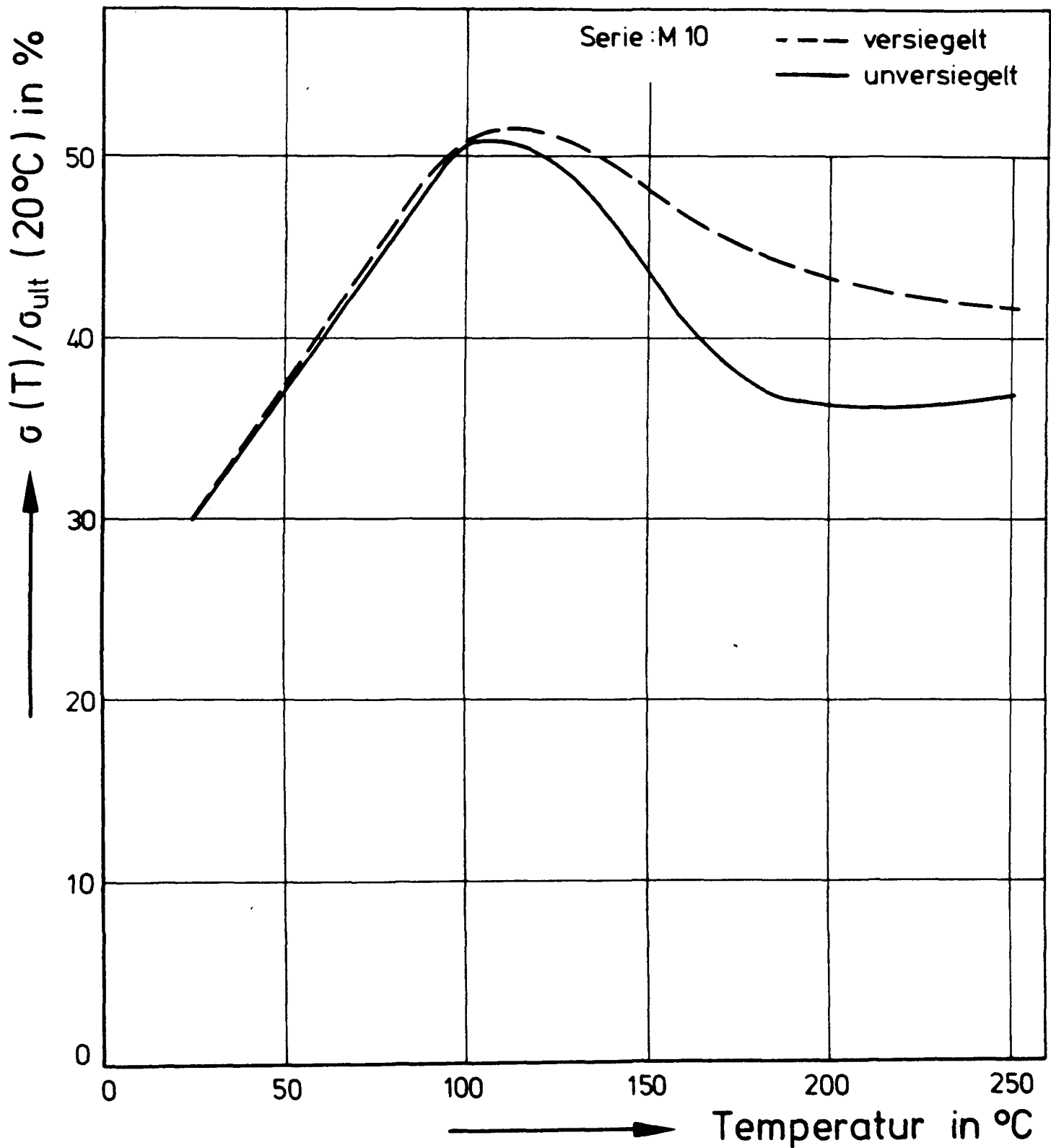


Bild 14: Zwangskraftentwicklung von versiegelt und unversiegelt aufgeheizten Mörtelproben

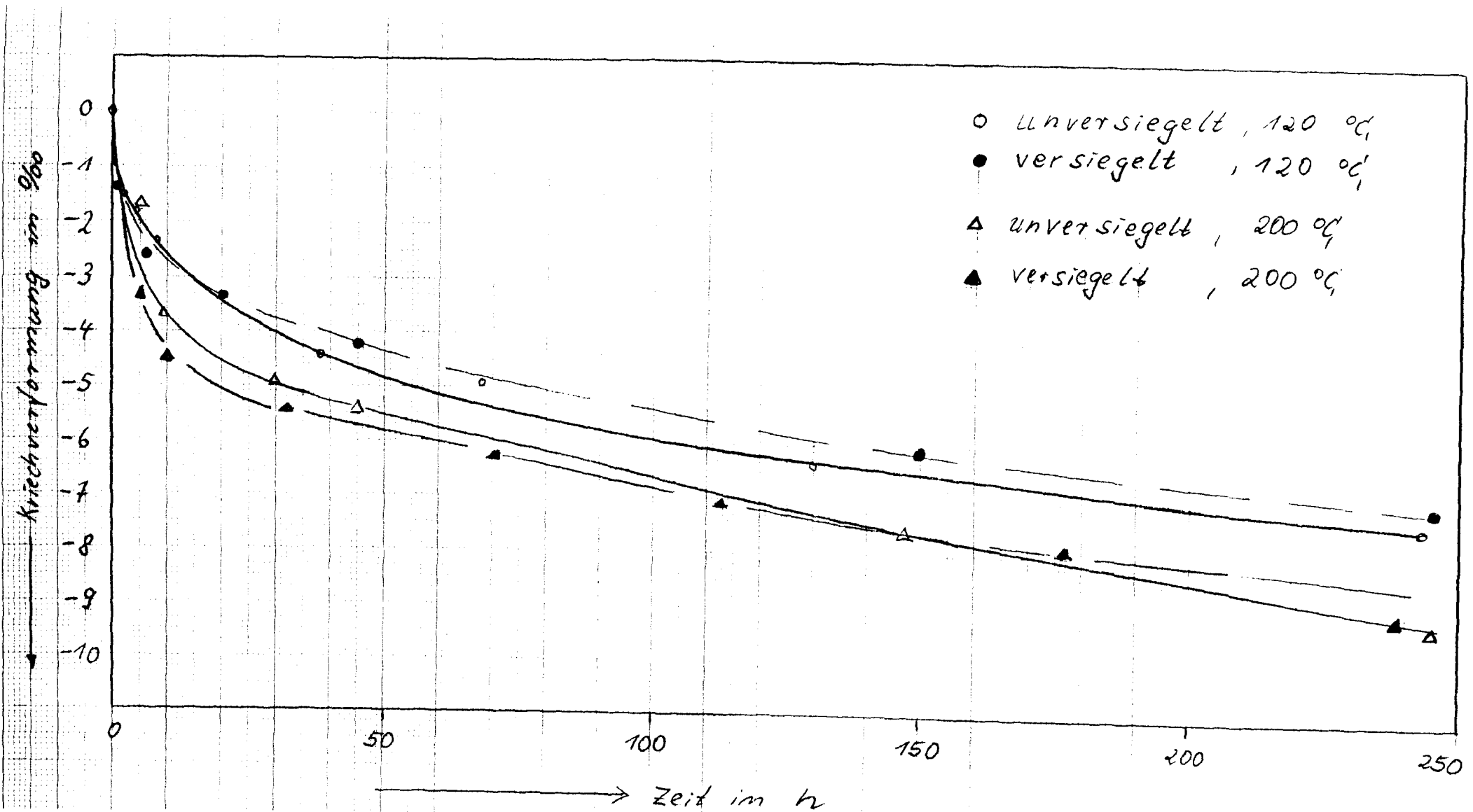


Bild 15: Stationäre Kriechverformungen von unter versiegelten und unversiegelten Bedingungen belastet aufgeheizten Zementsteinproben